

"Галерка пусть аплодирует,
а партер пусть встанет и потрясет
своими бриллиантами!"

-Пол МакКартни

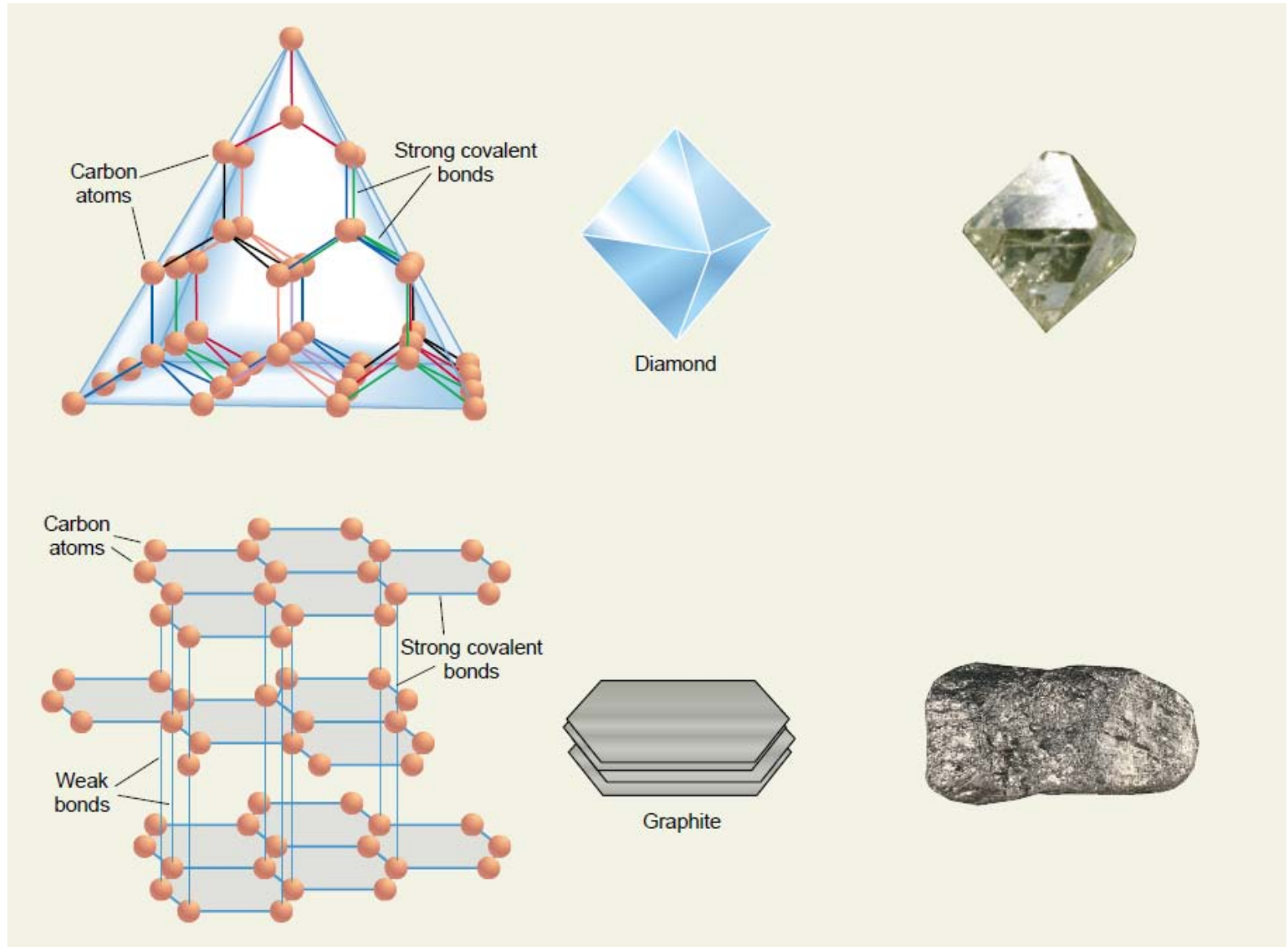
Алмазообразующие процессы

А.Л. Перчук

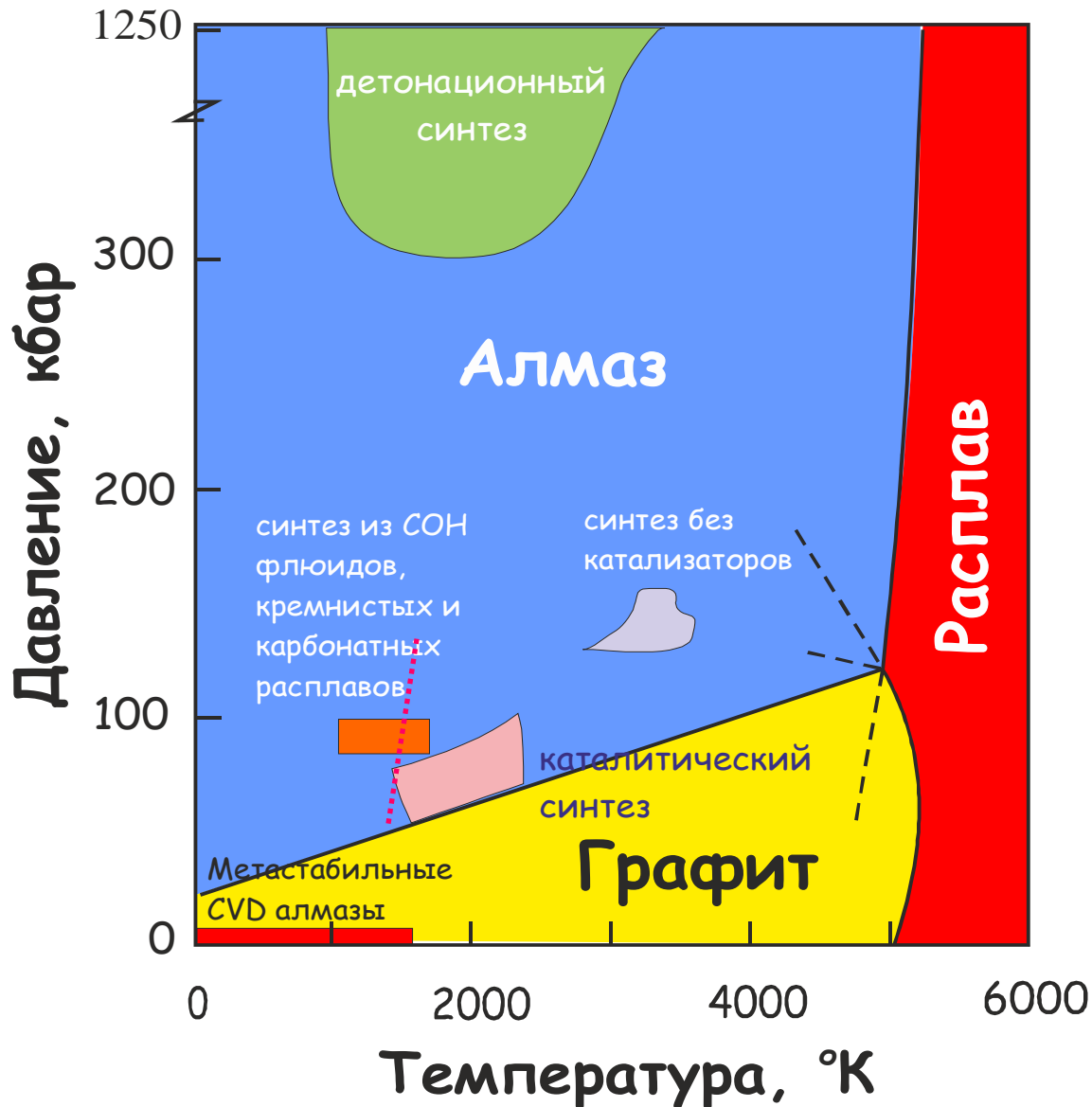
кафедра петрологии, геологический ф-т МГУ



Полиморфные модификации углерода и их структура



Термодинамические условия образования и синтеза алмаза



Прямого превращения графита в алмаз не происходит при температуре ниже 3000 К! Графит должен сначала раствориться в каком-либо веществе, лишь потом в случае пересыщения расплава (раствора) начнется кристаллизация алмаза.

Находки алмаза в природе

- в россыпях
- в метеоритах
- в метеоритных кратерах
- в трубках взрыва
 - кимберлитовые трубки
 - лампроитовые трубки.
- в метаморфических комплексах

Синтетические алмазы

Два метода синтеза:

- в условиях высоких давлений и температур (HPHT метод)
- в вакууме путем химического осаждения из газовой фазы (CVD метод)

Трубки взрыва - главный источник коммерческих алмазов на планете

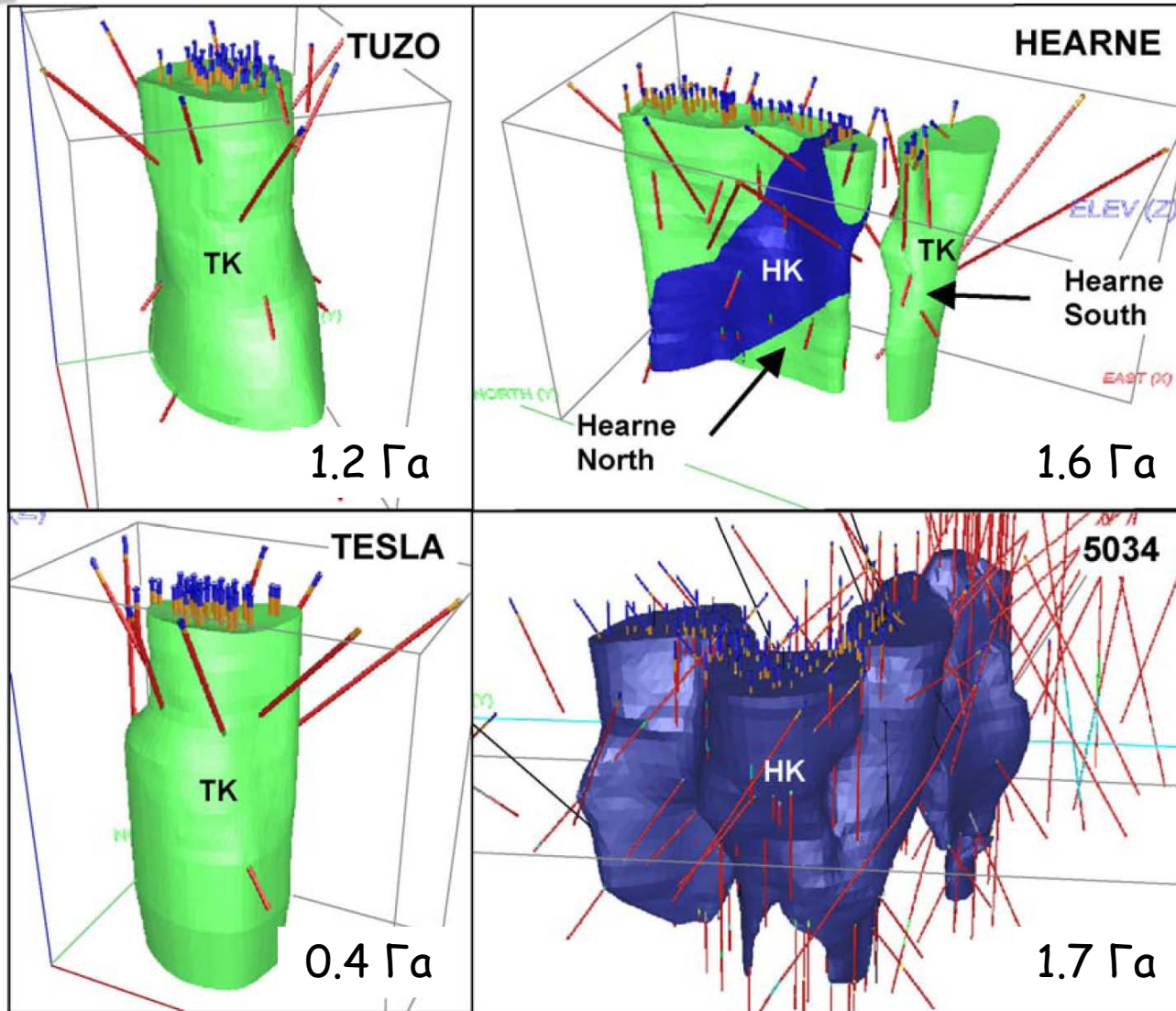
Высокая стоимость и предельная монополизация рынка алмазов ограничивают доступ ученых к образцам алмазоносных пород.



Почему трубки взрываются?



3D модели некоторых кимберлитовых трубок Канады

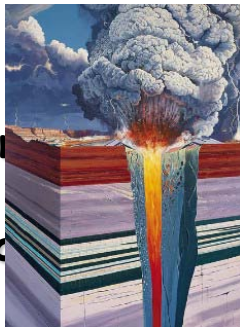


Зеленые = туфовые кимберлиты (TK); синие = гипабиссальные кимберлиты (HK); Га = гектары. Netman et al. (2004)

Почему трубки взрыва?

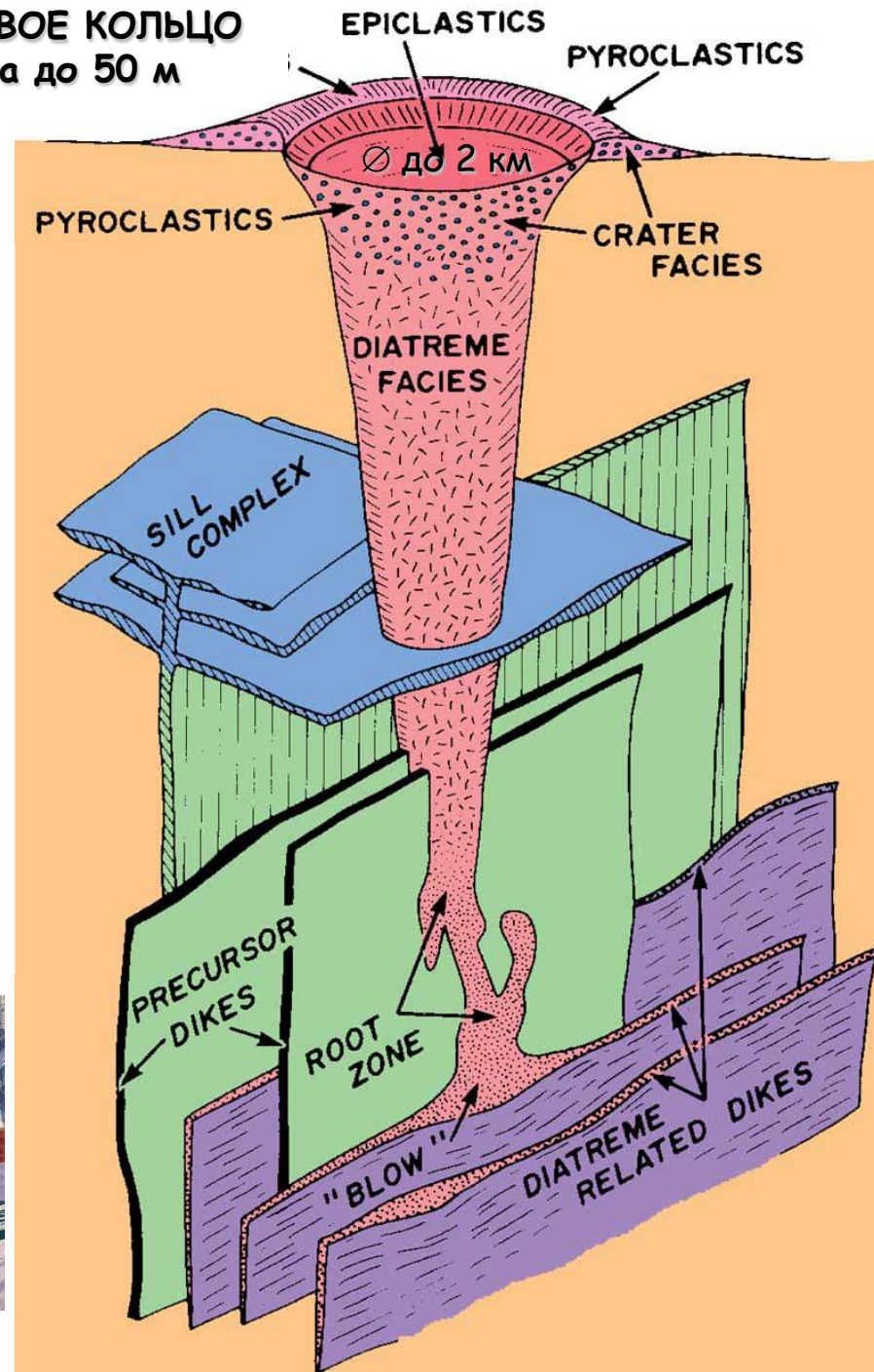
Извержение кимберлитовой магмы - это взрыв. Однако в отличие от типичных вулканов, извержение не приводит к формированию типичных конических построек. Образуется лишь небольшое туфовое кольцо (высотой 5-50 м) вокруг чашеобразной депрессии над подземной магматической колонной.

Рис. Модель идеализированной кимберлитовой системы: гипабиссальный дайково-силловый комплекс переходит в диатрему, к туфовому кольцу взрывного кратера. Диатремная часть увеличена для наглядности.



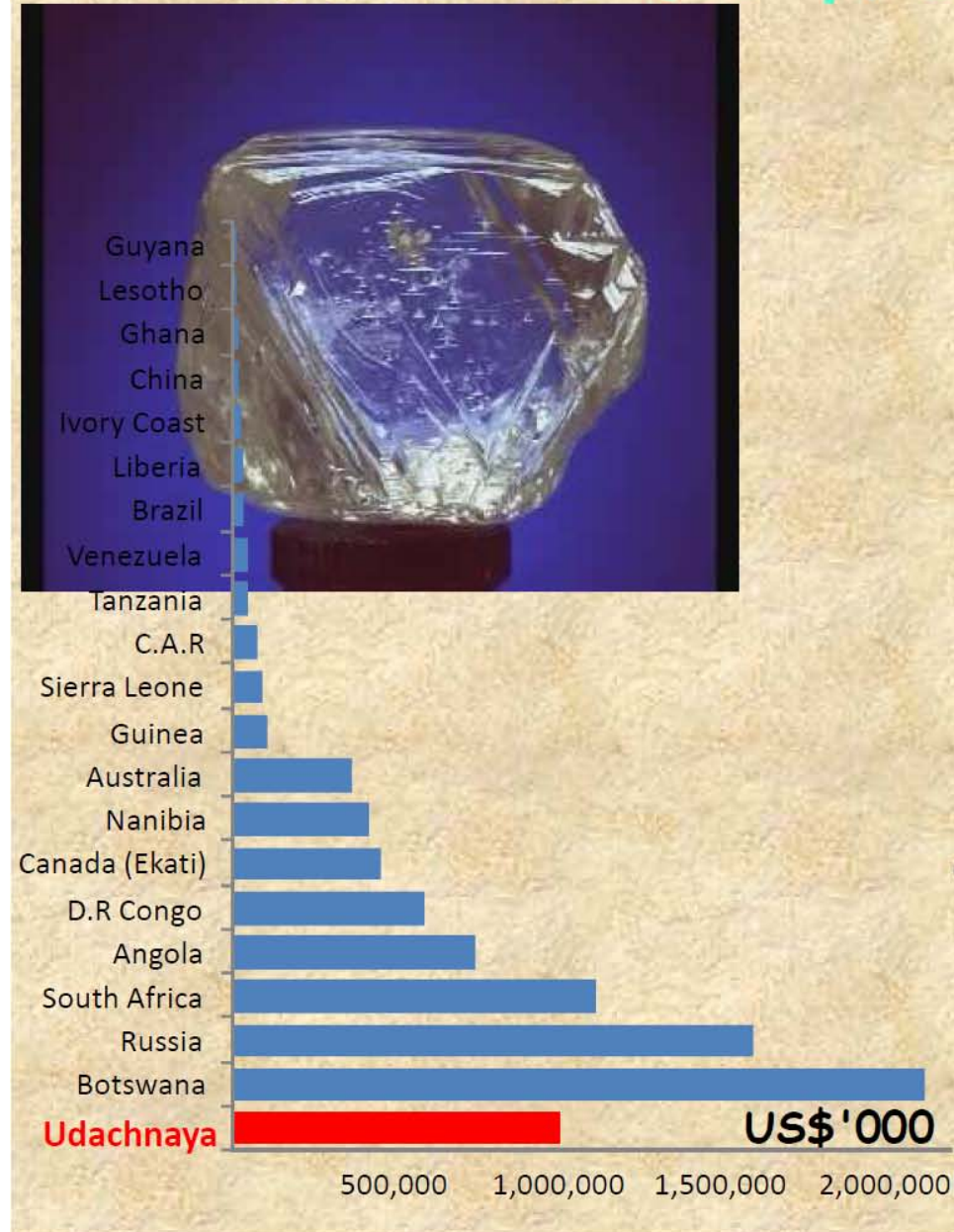
Mitchell (1986), Winter (2002)

ТУФОВОЕ КОЛЬЦО
высота до 50 м

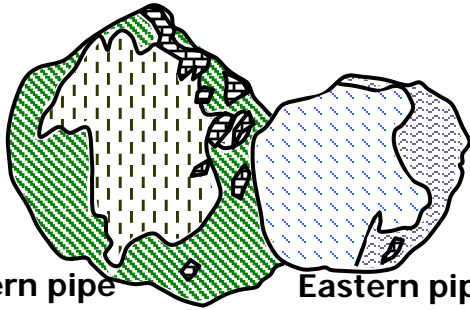
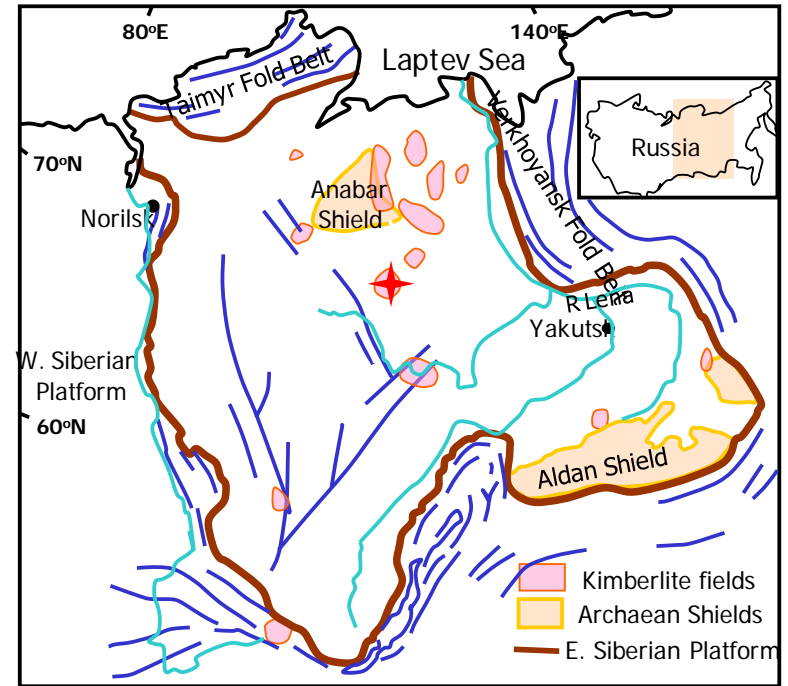


Трубка Удачная —
крупнейшее в мире
месторождение
алмазов.

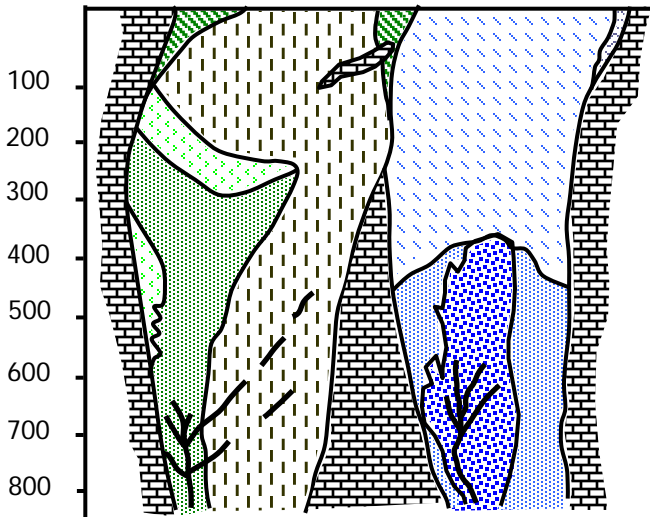
Открыта в 1955 году
В.Н. Щукиным.
Находится на севере
Якутии в 20 км от
северного полярного
круга.



Трубка Удачная



Western pipe Eastern pipe



Добыча алмаза в трубке "Удачная"..



Кимберлиты*

Семейство богатых летучими (с преобладанием CO_2) калиевых ультраосновных пород с отчетливой неравномернозернистой структурой, которая обуславливается присутствием в тонкозернистой матрице различных ксеногенных минералов (вкрапленники - оливин, биотит и др).

Материалы VI Международной Школы по Наукам о Земле ISES-2010. <http://ises.su/>

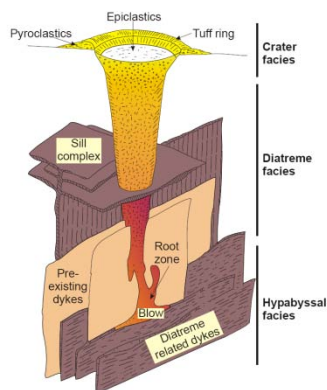


Materials of the VI International School on the Earth's Sciences ISES-2010. <http://ises.su/>

* названы по имени города Кимберли в Южной Африке.

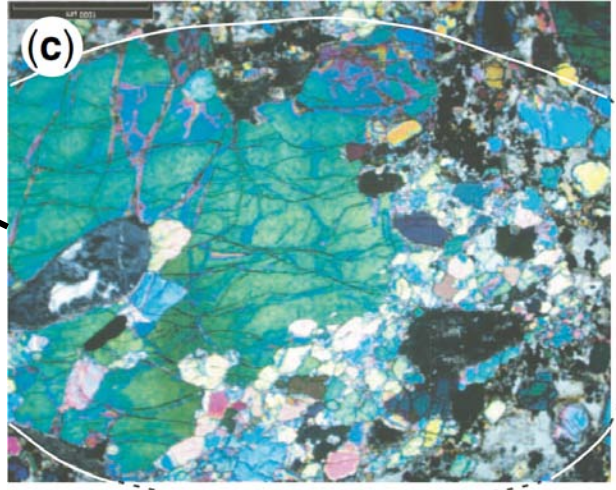
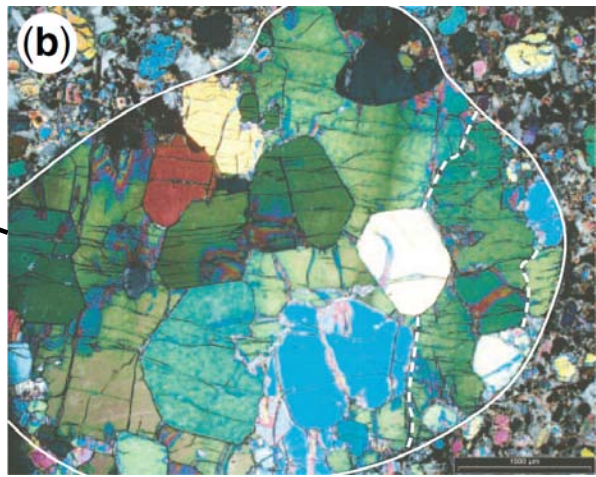
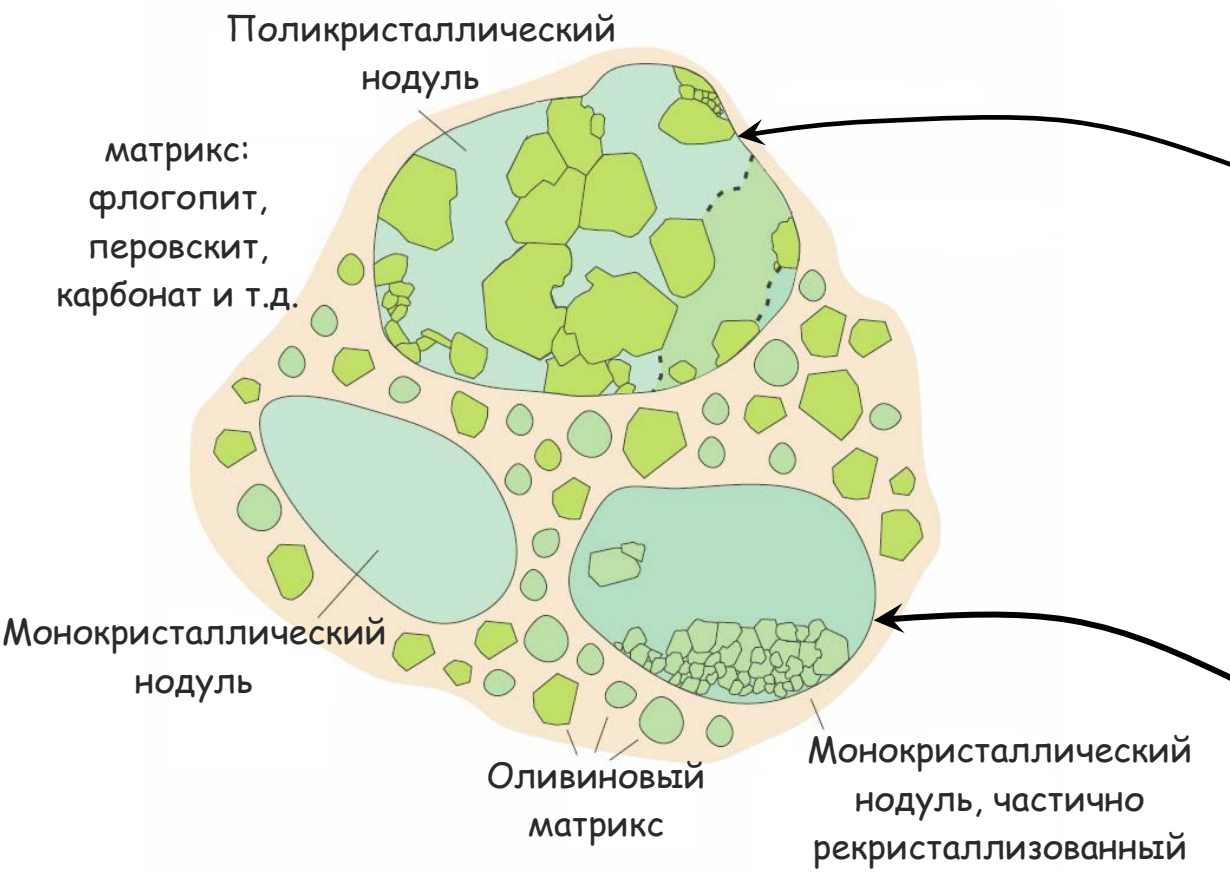
Состав кимберлита

Кимберлитовые магмы содержат большое количество летучих компонентов - CO_2 , H_2O . Их выделение из магмы возле поверхности и приводит к эксплозии с образованием характерной трубообразной формы кимберлитовых тел.



Вес.%	Кимберлит	Ультраосновная порода
SiO_2	35.2	41.4
TiO_2	2.3	0.05
Al_2O_3	4.4	0.9
FeO	9.7	12.6
MgO	27.9	42.9
CaO	7.6	1.0
Na_2O	0.3	0.8
K_2O	1.0	0.04
H_2O	7.4	0.01
CO_2	3.3	0.02
P_2O_5	0.7	0.04
Total	99.8	99.76

Во вкрапленниках в кимберлитах доминирует оливин!
Примечательно, что этот оливин не рос из кимберлитового расплава, т.е. является ксеногенным.



Arndt et al. 2010

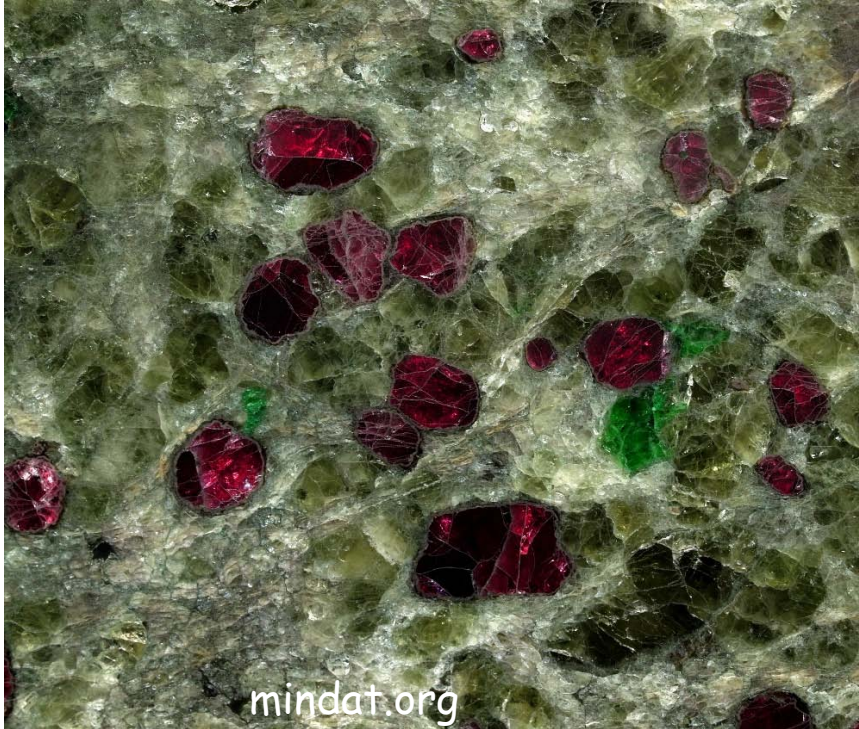
Почему отсутствуют пироксены? Ведь мантия сложена преимущественно гарцбургитами и лерцолитами - оливин-пироксеновыми породами.

Так выглядят главные породы мантии

гранат+оливин+

клинопироксен+ортопироксен

оливин + ортопироксен



Лерцолит



Гарцбургит

Оливин захватывается кимберлитовой магмой, а куда деваются пироксены? Чтобы ответить на этот вопрос нужно знать состав кимберлитового расплава.

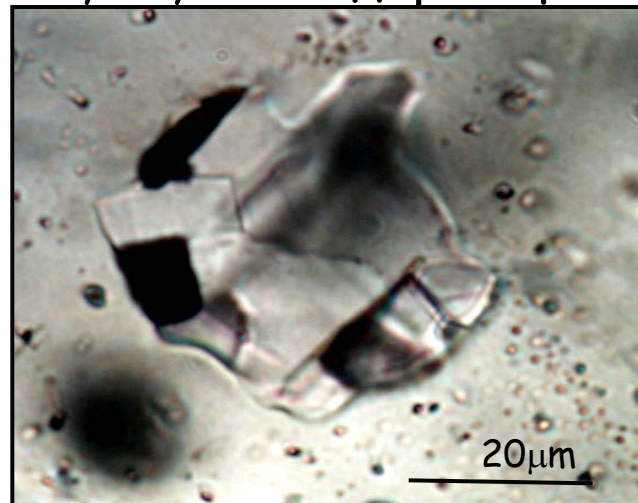
Состав расплава, из которого рос оливин

устанавливается по микровключениям в оливине.

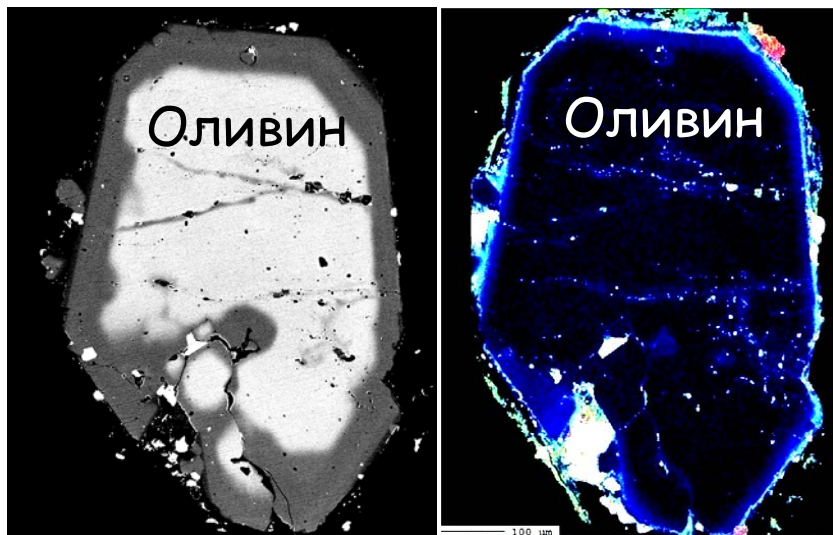
Во включениях преобладают следующие K, Ca, Na-содержащие минералы:

- карбонаты
- хлориды
- сульфаты
- фосфаты.

Силикаты (биотит, монтчелит) встречаются редко.



расплавные включения в оливине



Таким образом,
протокимберлитовый расплав – это агрессивная жидкость, богатая калием, кальцием, натрием, а также карбонат-, хлорит-, сульфат- и фосфат-ионами.

При воздействии этой жидкости на породы мантии пироксены замещаются оливинами и карбонатами.

Модель образования кимберлитов

(Arndt et al. 2008 с изменениями и дополнениями)

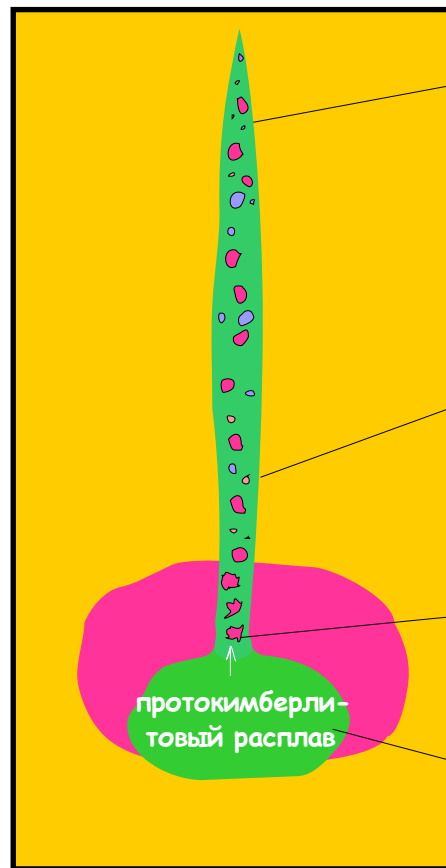
Стадия I: накопление флюида в основании литосферы; метасоматоз вмещающих пород



Дунит, образованный при метасоматозе перидотита

Накопление расплава (богатого CO_2 флюидом, K, Cl Mg) в основании литосферы

Стадия II: быстрый подъем флюидонасыщенного расплава



Миграция кимберлитовой магмы к поверхности

оплавление дунитовых ксенолитов и ксенолитов вмещающих пород

Захват магмой дунитовых ксенолитов

Проникновение флюида по трещинам и быстрое турбулентное перемещение к поверхности

Примечательно, что трубки имеют вполне определенное геологическое положение

Находки алмазов в трубках взрыва (черные ромбы) приурочены к кратонам



(Harlow and Davies 2005)

Возраст кимберлитов: от 1750 млн. лет (трубка Премьер, Южная Африка) до 20 млн. лет (трубки Австралии).

Возраст алмазов: от 3300 до 1000 млн. лет



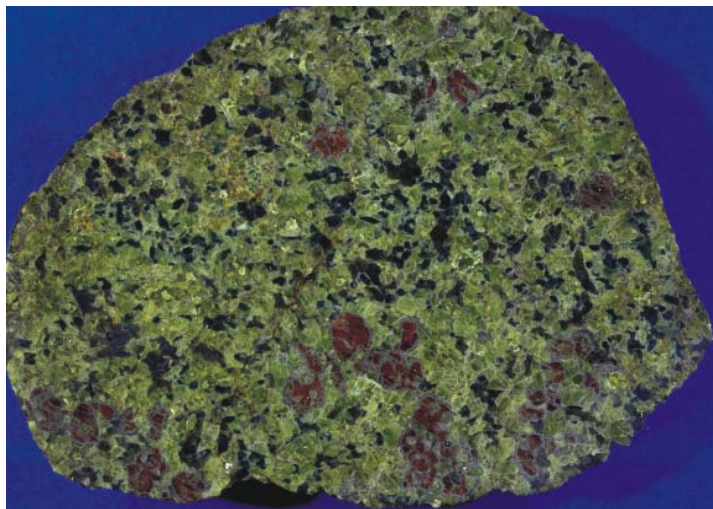
Алмазы образовались раньше, чем кимберлиты. Следовательно, кимберлитовые расплавы играют роль транспортера (лифта), поднимающего алмазы к поверхности Земли.



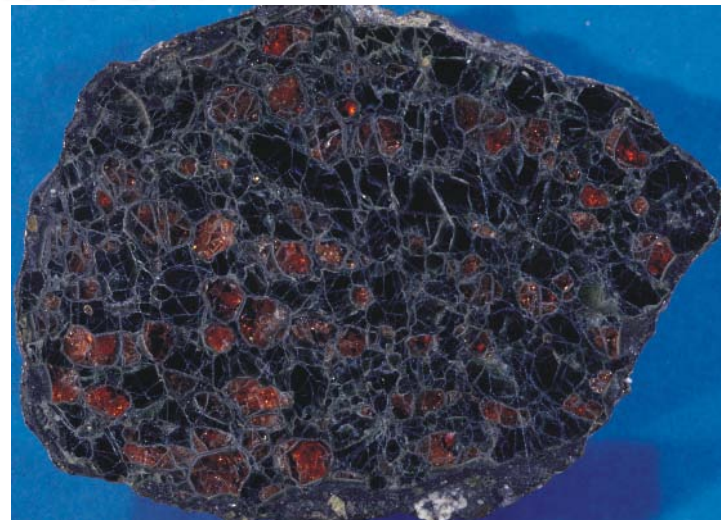
Принято считать, что алмазы генетически не связаны с кимберлитовой магмой, они находятся в ксенолитах (нодулях), представленных следующими породами:

- перидотитами;
- эклогитами;
- пироксенитами.

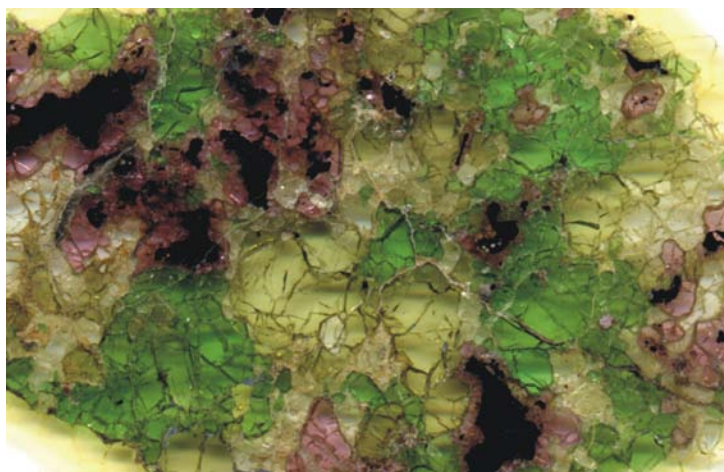
Основные типы мантийных ксенолитов в кимберлитах



Гранатовый лерцолит



Гранатовый пироксенит



Гранат/шпинелевый лерцолит



Шпинелевый лерцолит
Слайд В. Каменецкого

Количественные соотношения разных типов мантийных ксенолитов в кимберлитах по О.Г. Сафонову

Трубка	Перидотиты	Пироксениты	Эклогиты
Якутия			
Мир	78.4	19.6	2.0
Интернациональная	87.7	9.6	2.7
Удачная	91.9	4.4	3.7
Дальняя	85.0	13.0	2.0
Комсомольская	96.0	1.5	2.5
Обнаженная	36.0	38.0	26.0
Сатыканская	95.5	1.2	3.3
Архангельск			
Трубка им. В. Гриба	65.1	18.6	16.3

Большинство "кимберлитовых" алмазов находится в виде включений в главных минералах перидотитов и эклогитов.

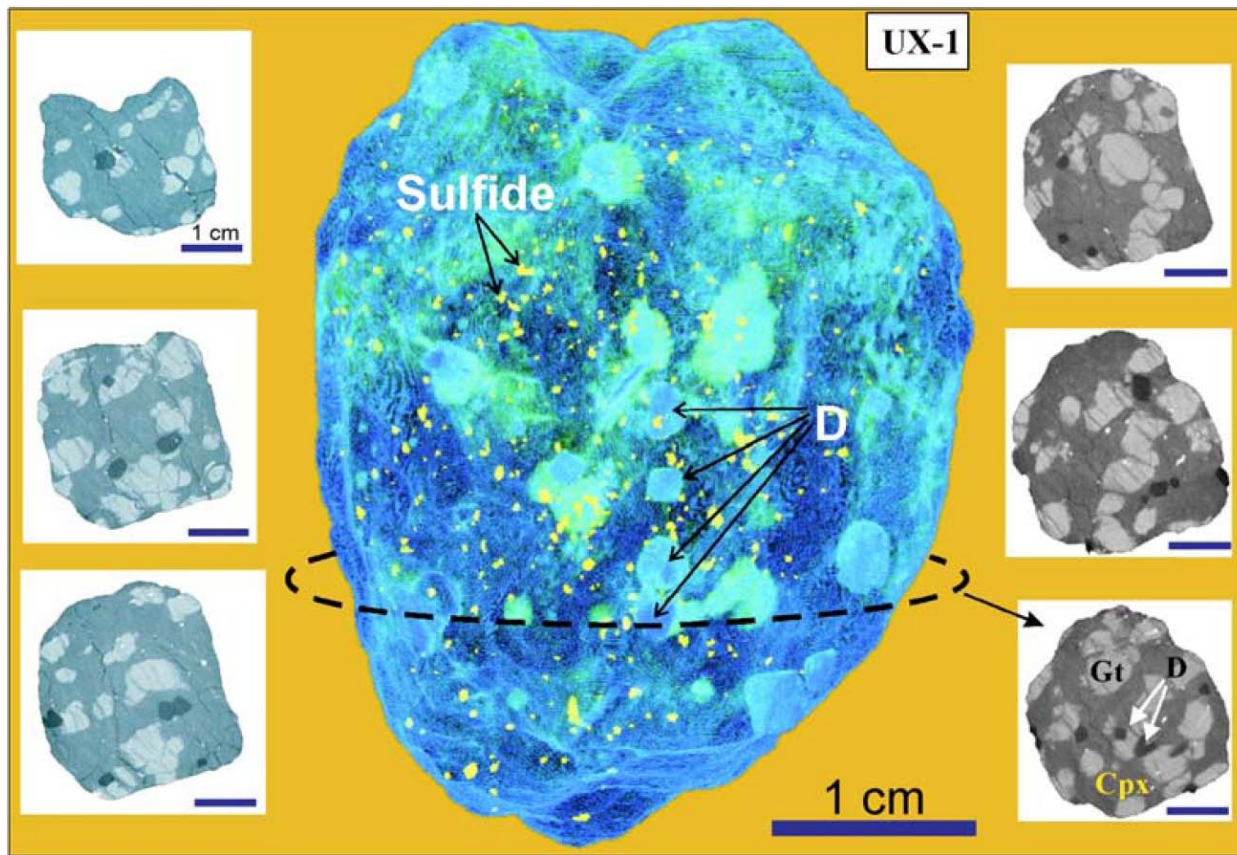


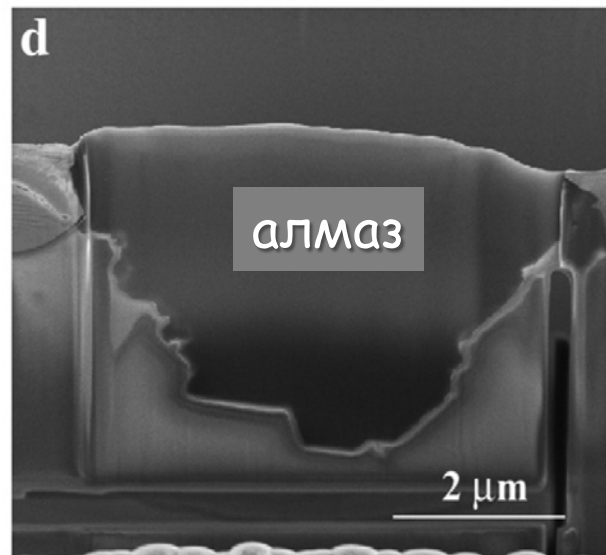
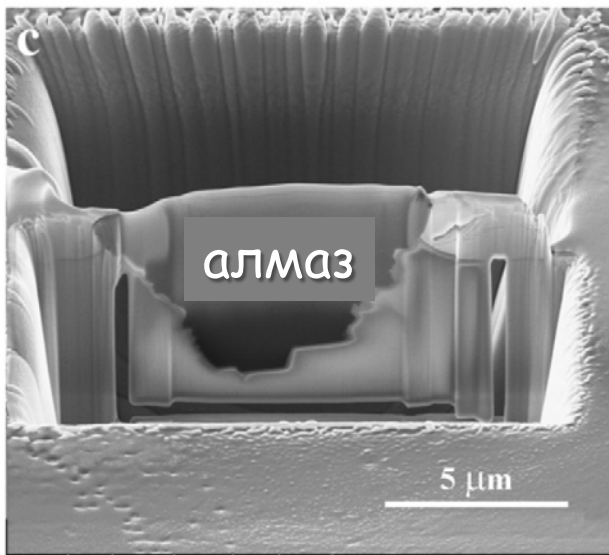
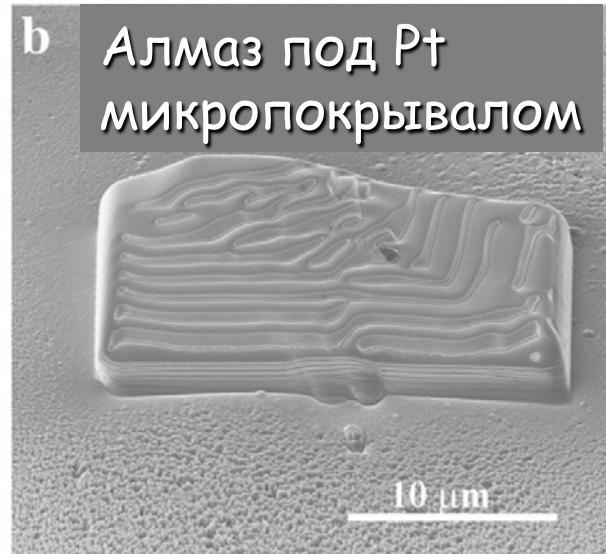
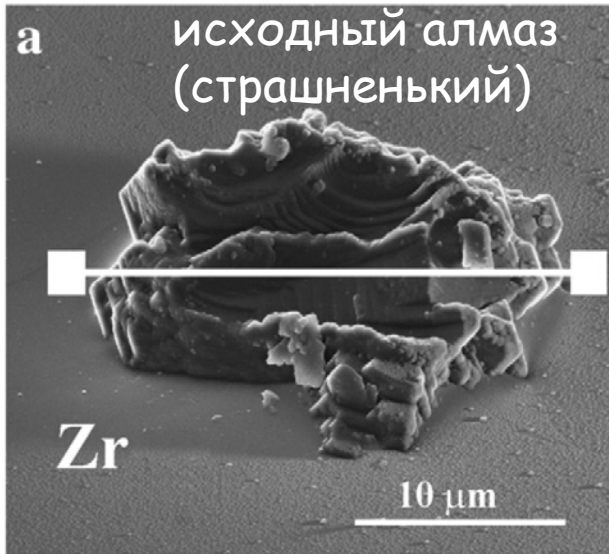
Рис. 3D модель ксенолита эклогита из трубки Удачная. Алмазы - черные. Рентгеновская томография. Anand et al. (2004)

Эксперименты показывают, что в этих породах алмазы не растут даже при очень высоких давлениях и температурах.

Что же является алмазообразующей средой?

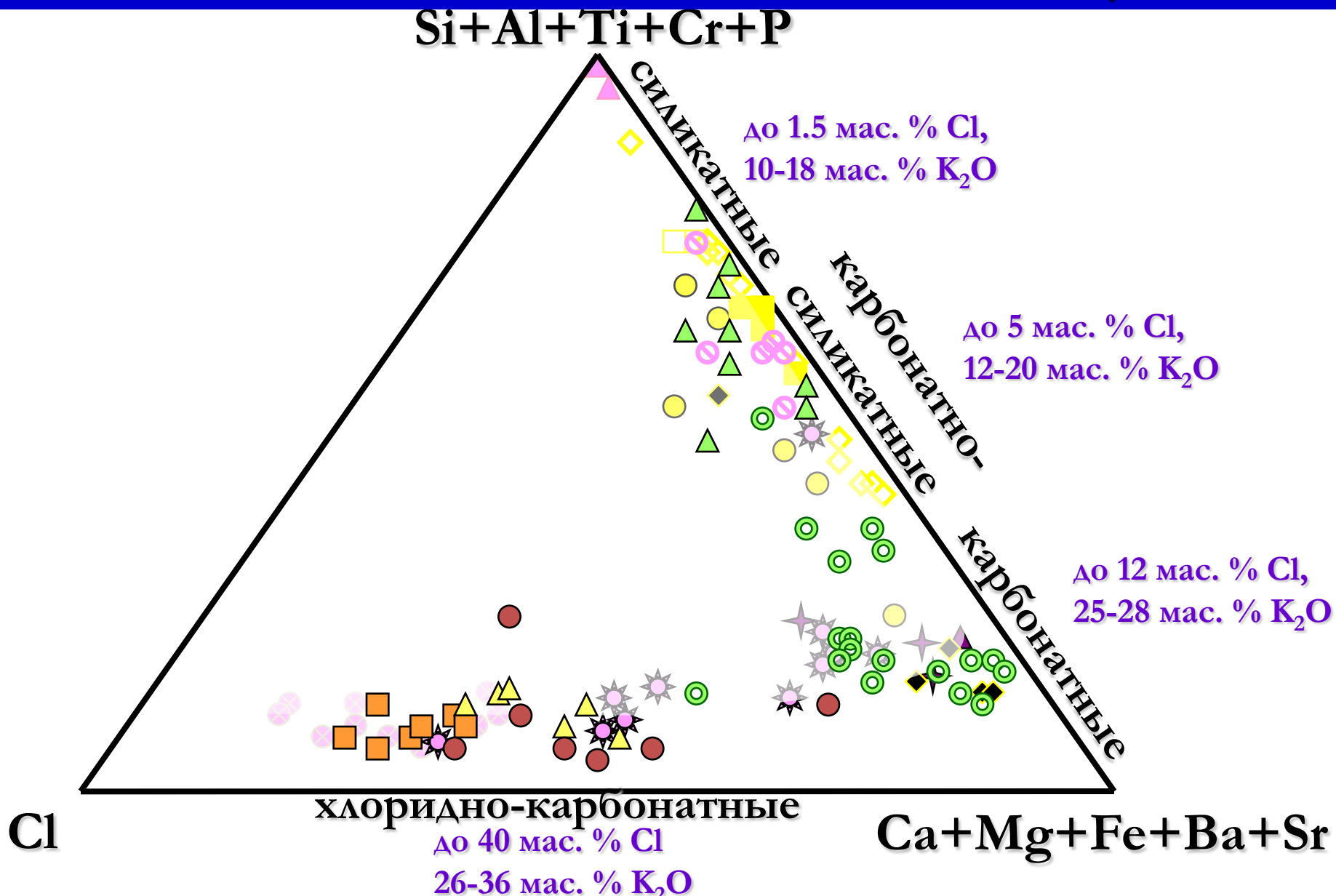
Для ответа на этот вопрос нужно заглянуть внутрь алмаза.

Резка алмаза фокусированным ионным пучком (метод FIB - Focused Ion Beam)

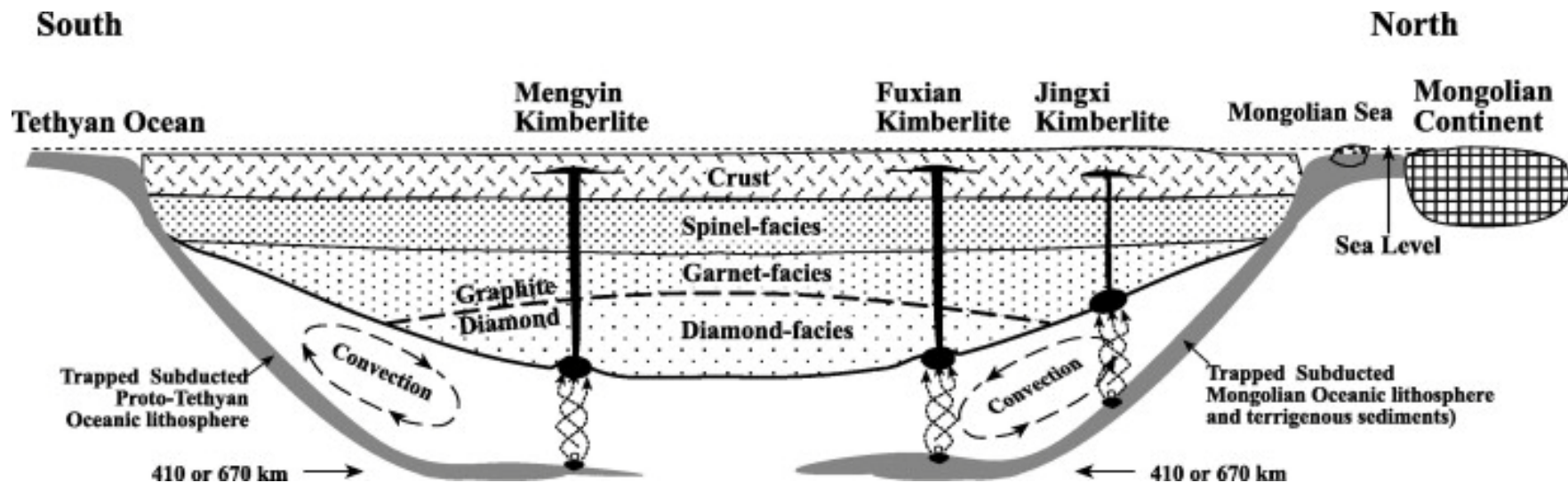


Резка алмаза
осуществляется
пучком
ионов галлия
 Ga^+ при 30 kV
и ~20 nA.

Алмазообразующая среда: СОСТАВ ЖИДКОСТЕЙ В АЛМАЗАХ ИЗ КИМБЕРЛИТОВ



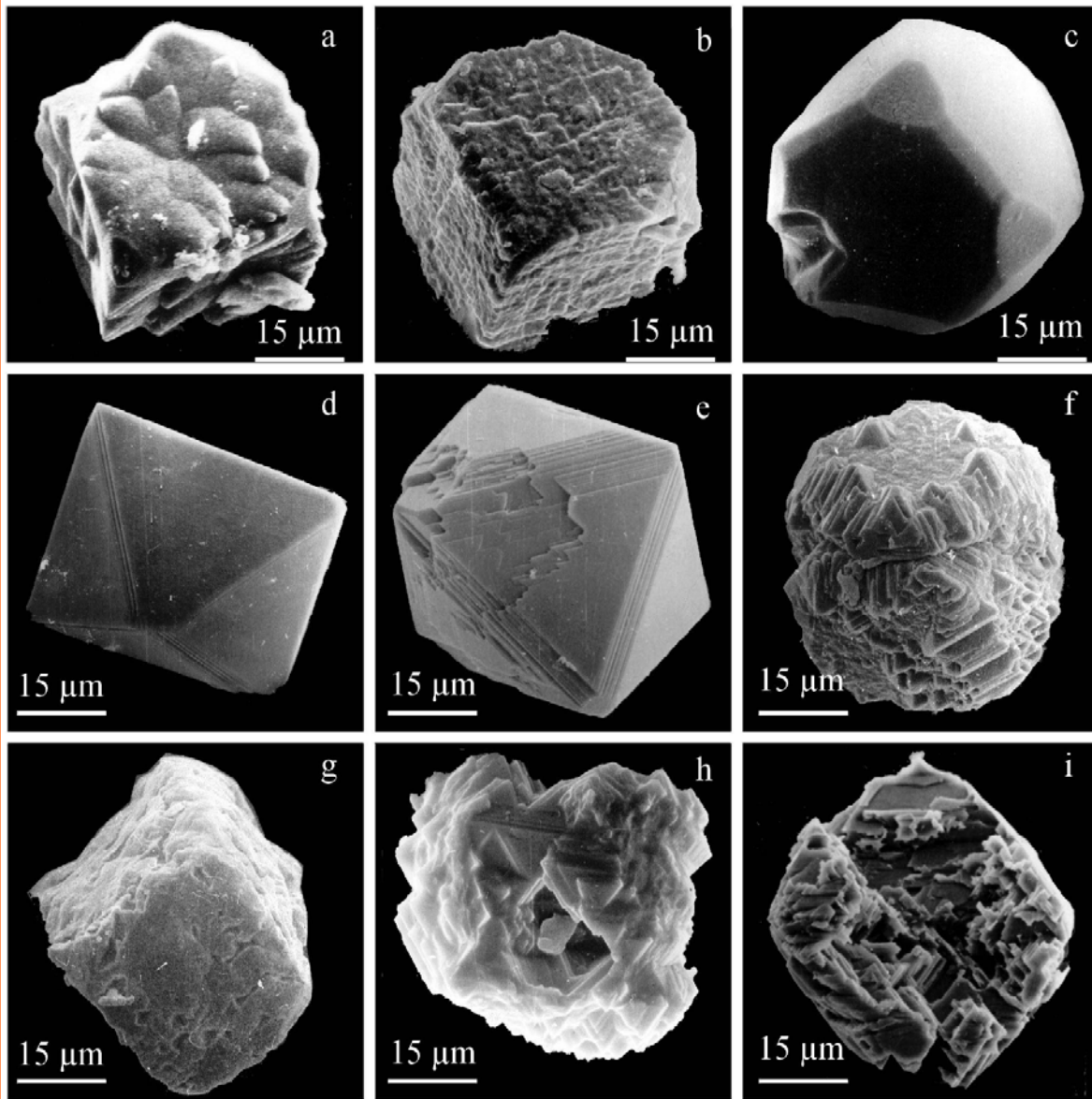
Источник флюидных компонентов находится, по всей видимости, в субдуцирующих литосферных плитах



Zhang et al (2010)

Алмазы метаморфических комплексов

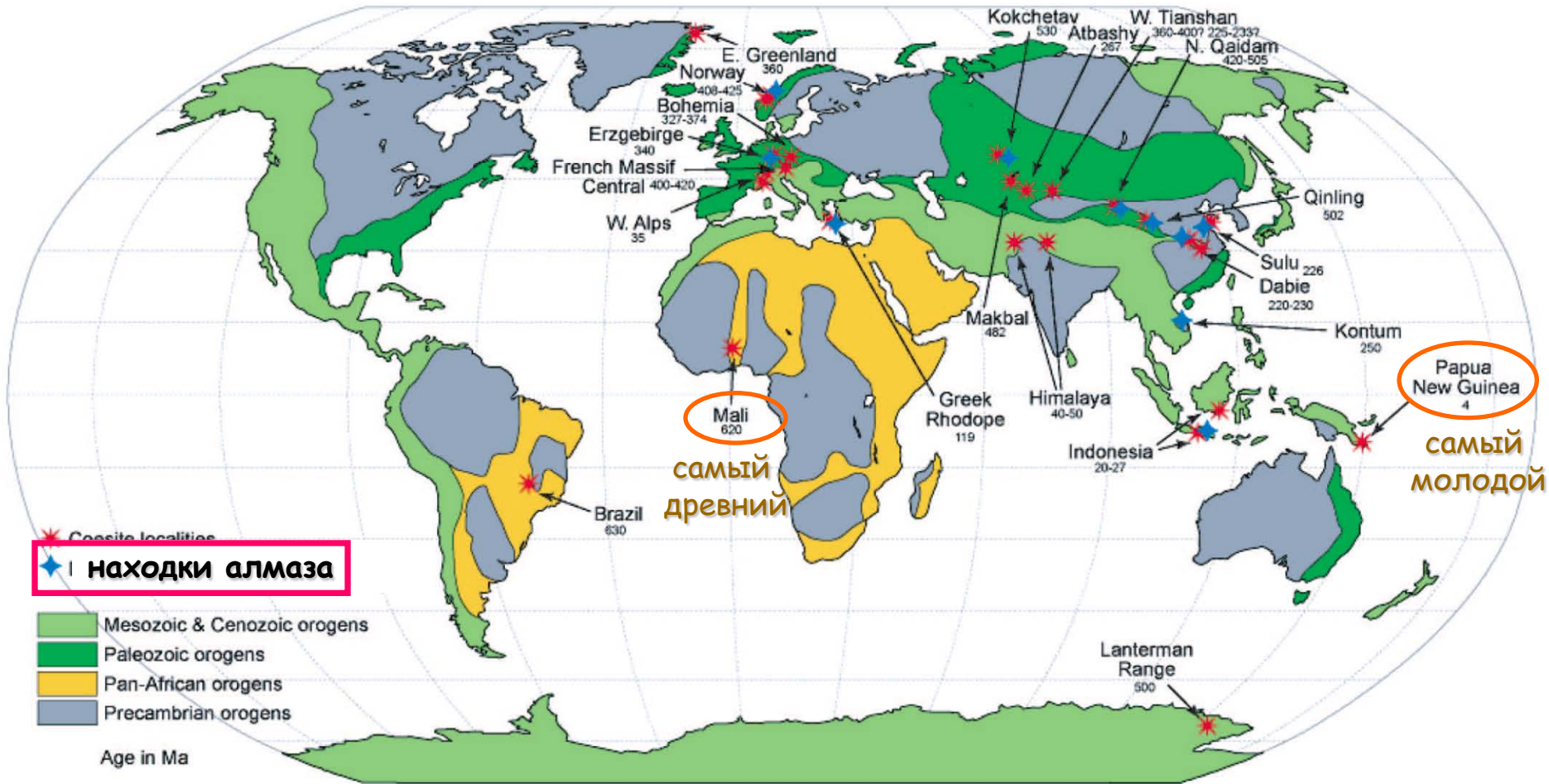
Галерея А.В. Корсакова 2011



Морфологические типы кристаллов алмаза из пород Кокчетавского массива.

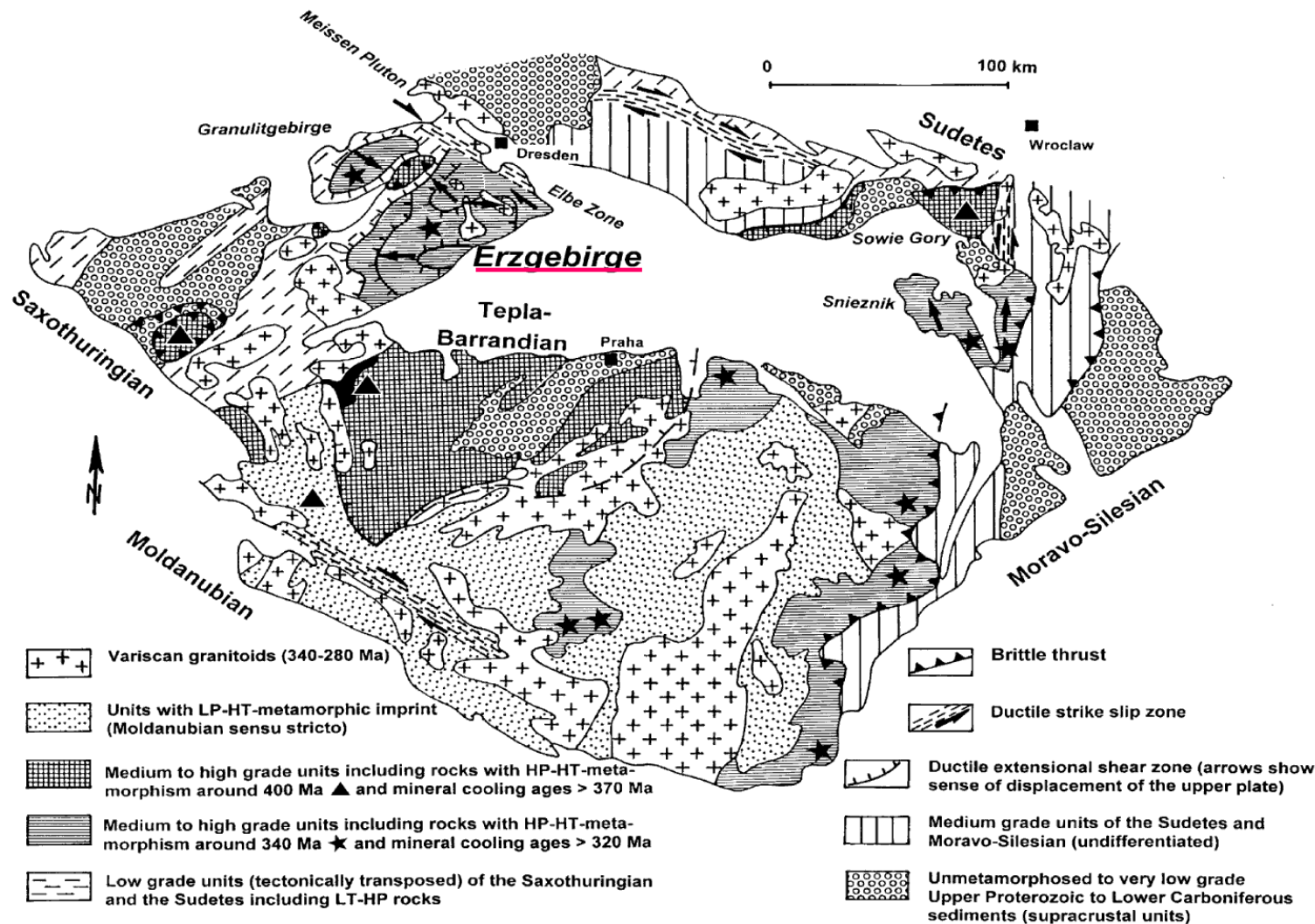
(a-c) биотитовые и кианитовые гнейсы, (d-f) клиноцоизитовые гнейсы, (g-i) гранат-клинопироксеновые породы и мраморы.

Находки алмаза и коэсита в метаморфических комплексах

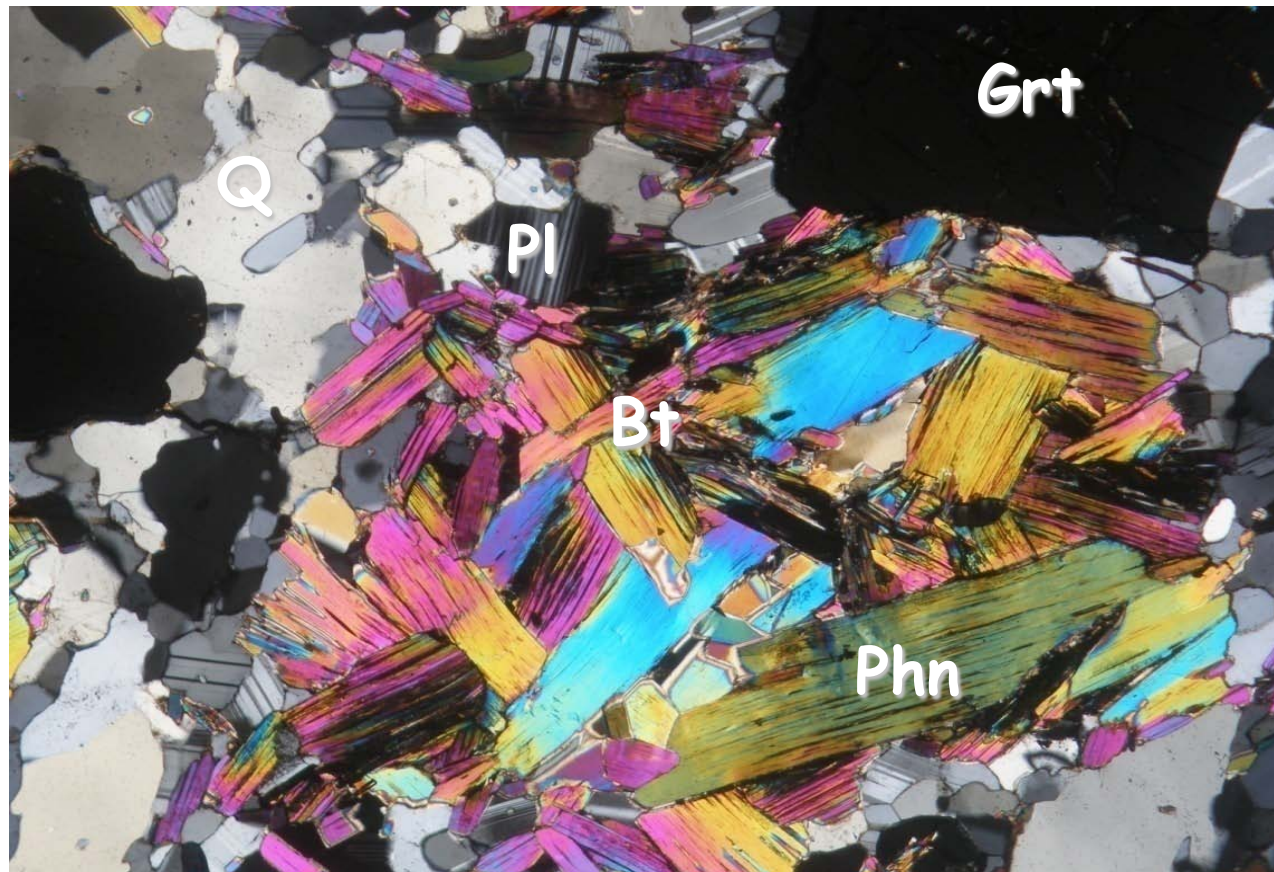


Liou et al., 2007

Алмаз в Рудных горах Германии



Гранат-двуслюдяной гнейс - типичная порода средней степени метаморфизма. Ничто не предвещало находок в нем алмаза и других фаз сверхвысокого давления.



фотография шлифа, николи X

Simple identification and quantification of microdiamonds in rock thin-sections

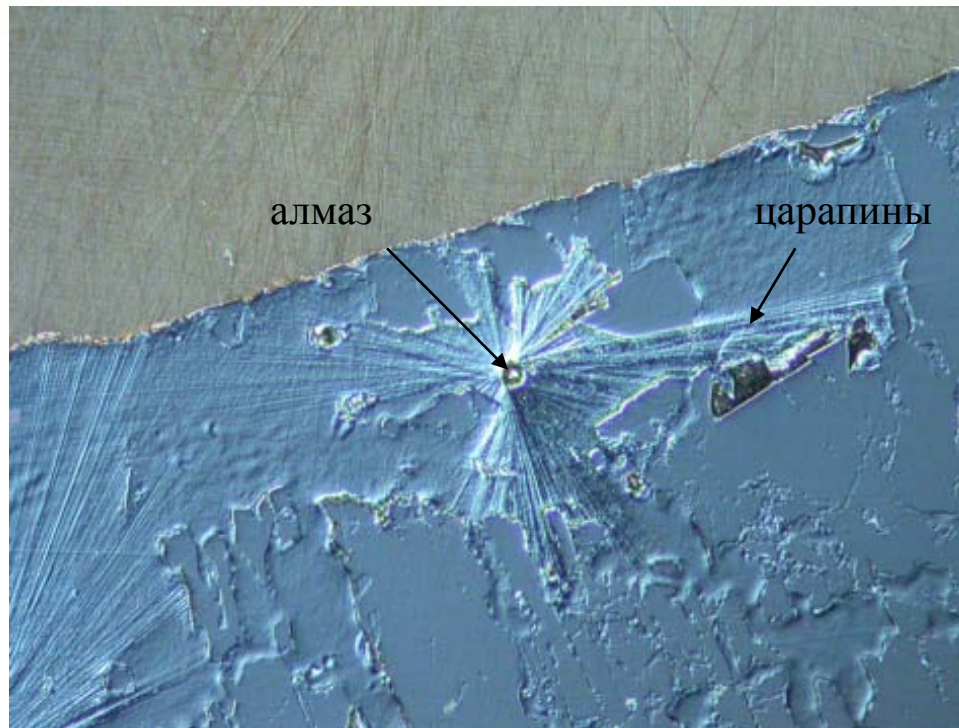
[Print](#)[E-mail](#)[Add to Marked List](#)[Save to EndNote® Web](#)[Save to EndNote®, RefMan, ProCite](#)[more options](#)

Author(s): [Massonne HJ](#), [Bernhardt HJ](#), [Dettmar D](#), [Kessler E](#), [Medenbach O](#), [Westphal T](#)

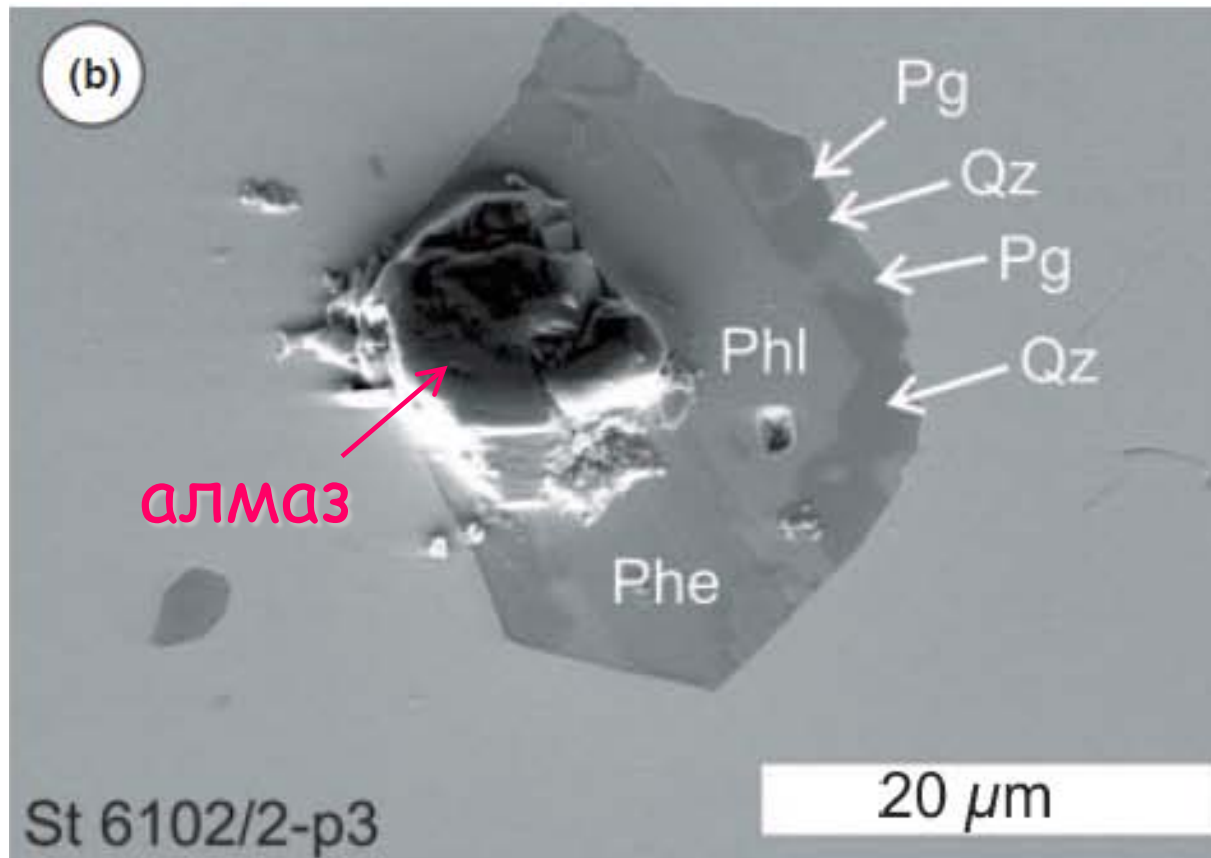
Source: EUROPEAN JOURNAL OF MINERALOGY **Volume:** 10 **Issue:** 3 **Pages:** 497-504 **Published:** MAY-JUN 1998

Times Cited: 12 **References:** 12 [Citation Map](#)

Abstract: Using a method of preparing polished thin-sections described in this paper, we are able to detect microdiamonds in high-pressure metamorphic rocks quickly and quantitatively by a distinctive striation pattern on the polished surface of the thin-section. We present results on samples from diamondiferous gneiss and marble of the Lake Kumdy-Kol region of the Kokchetav Massif, Northern Kazakhstan. Our method clearly reveals microdiamonds as small as 1 μm by a striation pattern as soon as they emerge on the surface during the polishing procedure. The striation pattern on the polished surface disappears almost immediately after extraction of the microdiamond that caused it. More than six hundred polished thin-sections of various kinds of igneous and metamorphic rocks mostly without a high-pressure origin were examined, but this type of striation pattern was found in less than 1 % of these. In such examples the striations could also be due to the contamination of diamond from external sources.



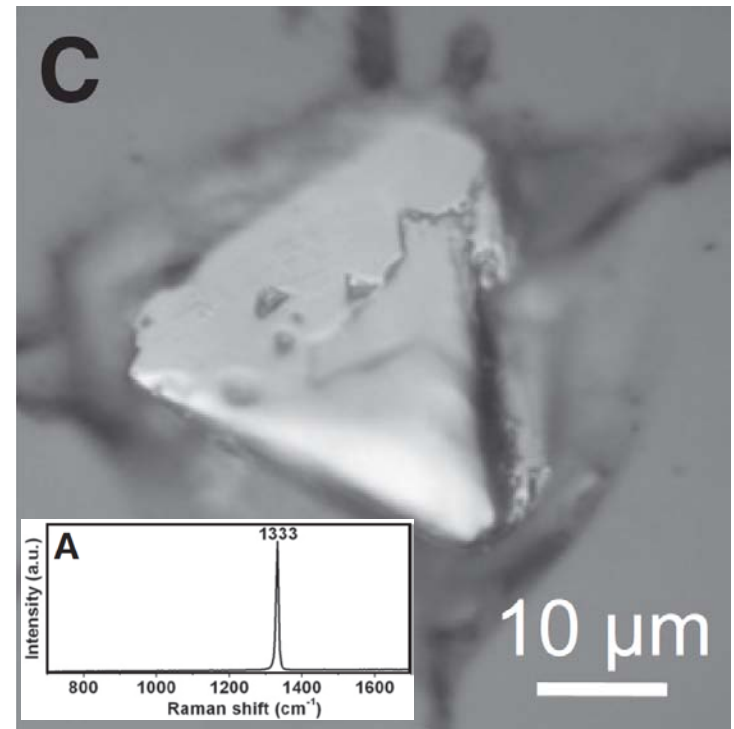
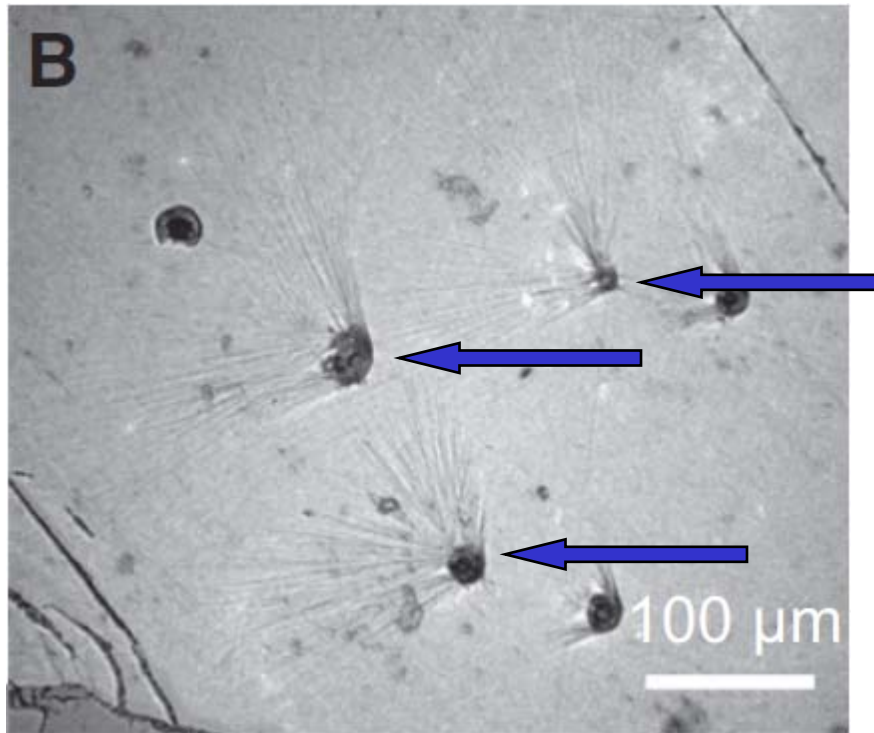
Сноповидные
агрегаты
радиальных
царапин вокруг
алмаза при
изготовлении
шлифов.



Полифазное включение с алмазом в гранате из алмазоносного гранат-двуслюдяного гнейса, Рудные Горы, Германия (Stoesshert et al., 2004). Изображение во вторичных электронах (SE).

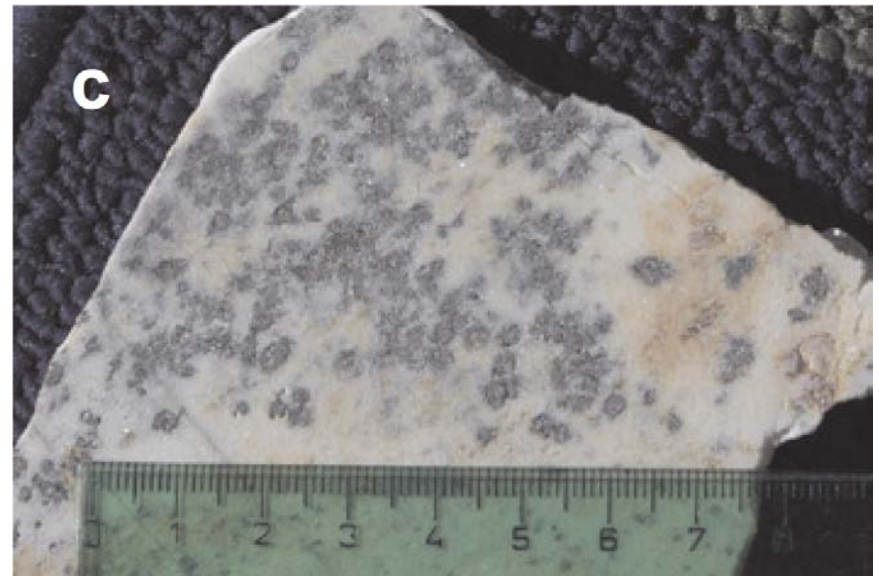
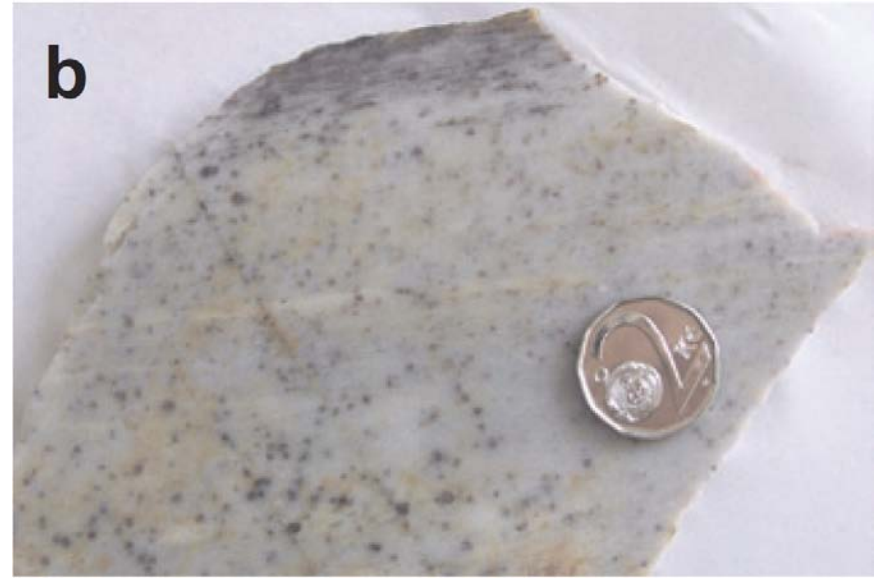
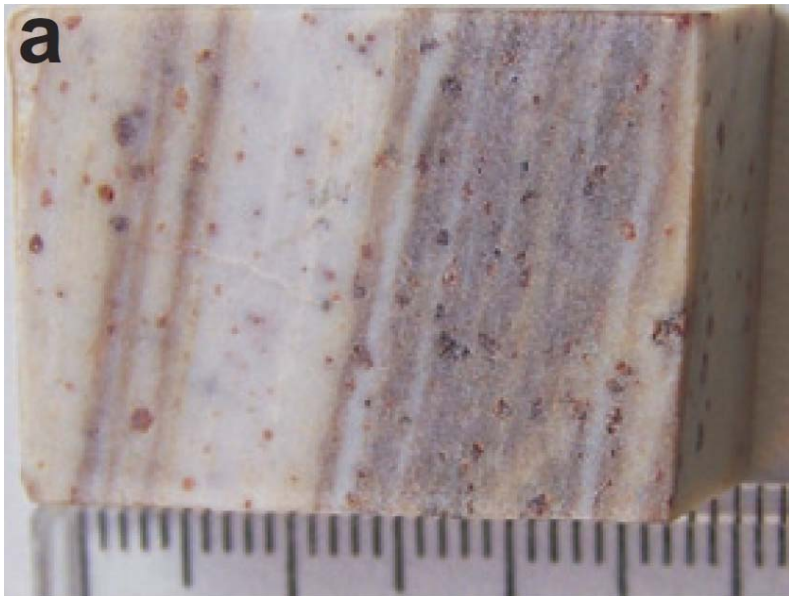
Богемский массив, Чехия

Еще одна сенсационная находка алмаза (и коэсита) в хорошо изученных гнейсах (возраст ~350 млн. лет)



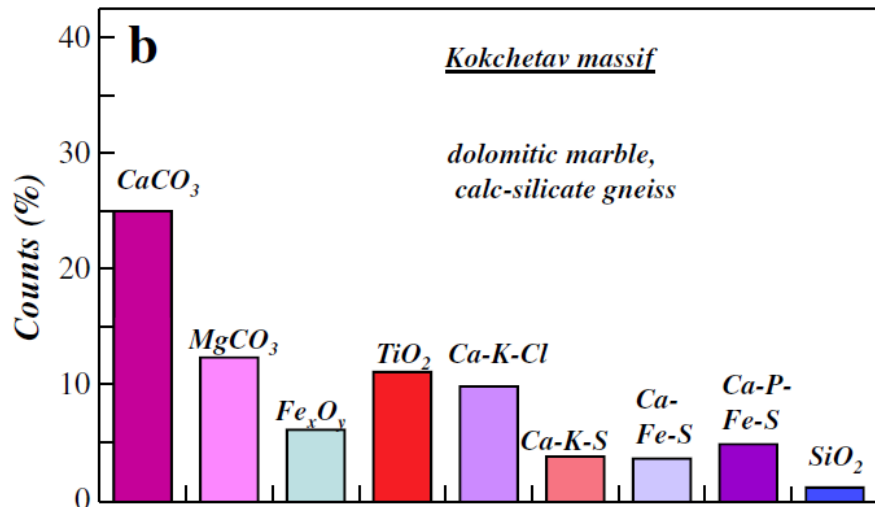
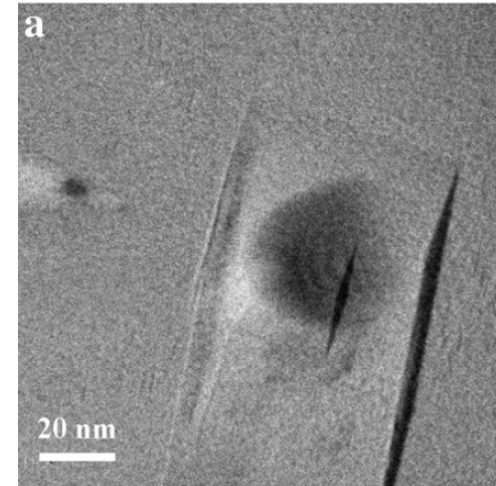
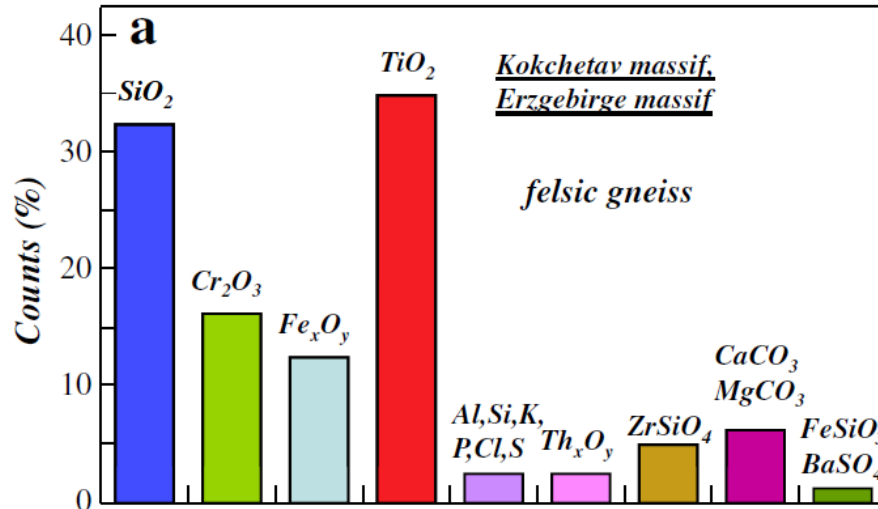
Алмазы в гранатах окружены сноповидными царапинами.
Изображения в отраженном свете.

Алмазоносные гнейсы Богемского массива



Kotkova, 2007

Рост алмазов, обнаруженных в метаморфических породах, происходит из надкритической жидкости, в которой доминируют Н, С, О и растворенные компоненты - Si, K, Na, Al.



Состав веществ, находящихся во включениях в алмазе из комплексов Эрцгебирге и Кокчетавского массива.

Dobrzhinetskaya (2012)

Импактные алмазы

Причина взрыва: резкое торможение космического тела при столкновении

Энергия 10^{19} - 10^{23} Дж (атомная бомба над Хиросимой $6 \cdot 10^{13}$ Дж)

Продолжительность: от 10^{-9} -1 сек

Давление: 100-300 ГПа.

Температура: до 10000-15000°C

Топигайская астроблема

Возраст: 57.5 млн. лет.

Диаметр кратера: 100 км

Ударник: архейские графитсодержащие гнейсы.

Алмазы находятся в импактных расплавах и брекчиях (слои до 1 км).

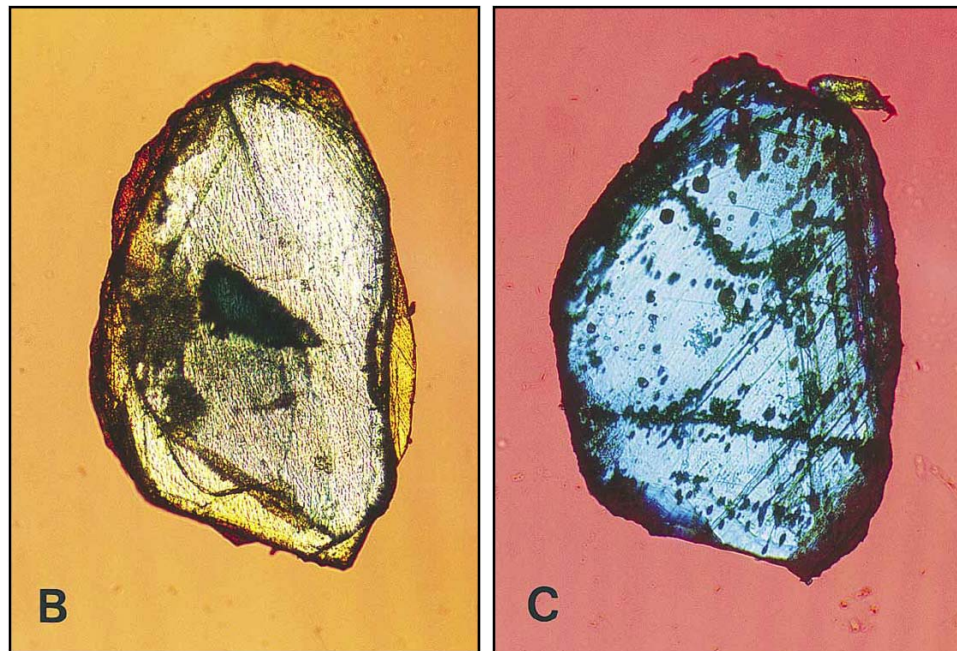
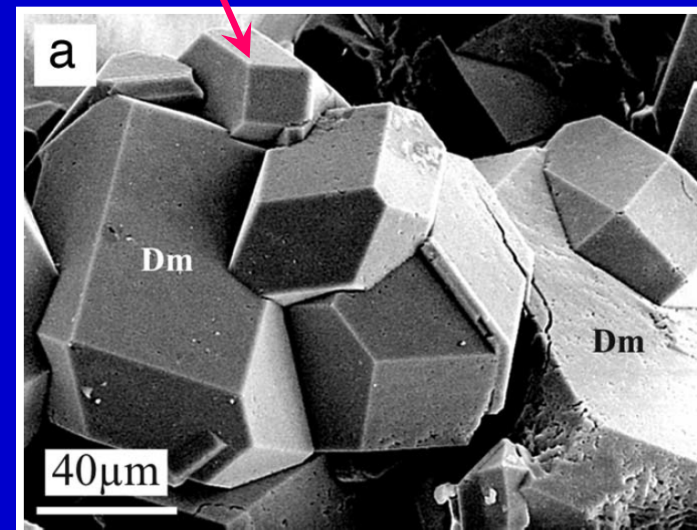


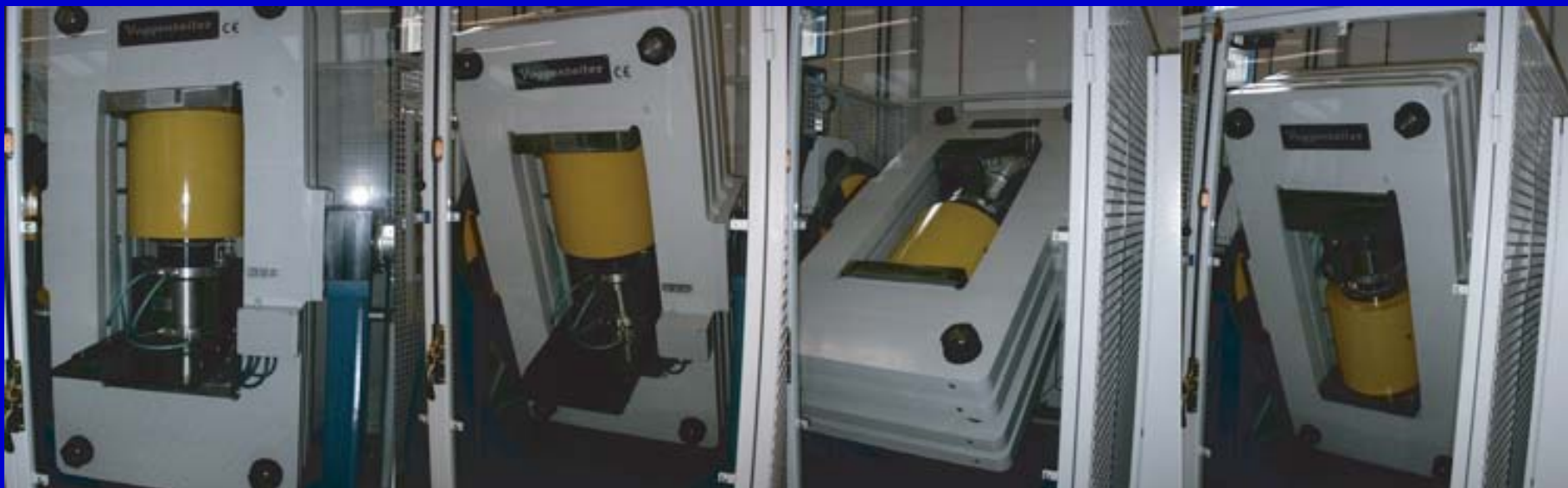
Рис. Алмазы до 560 μm (в) и 570 μm (с)
(Koeberl et al., 1997)

Синтетические алмазы-1

Синтез в условиях высоких давлений и температур (HPHT метод)

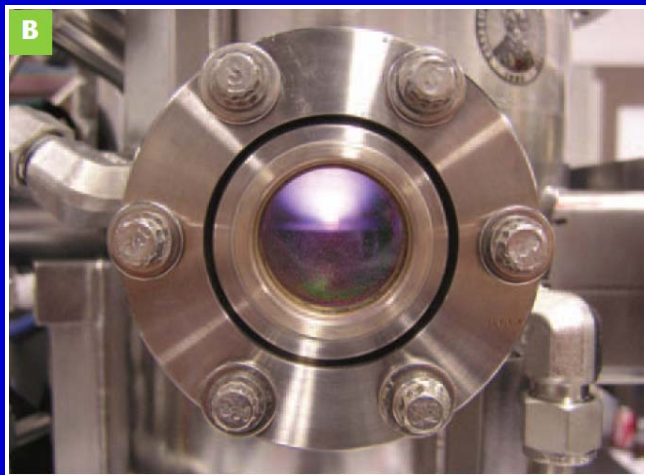
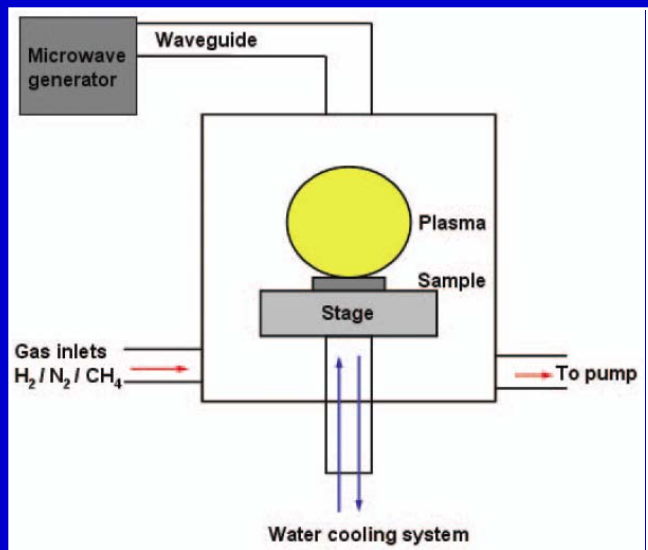


Palyanov et al 2007



Синтетические алмазы -2

Синтез в вакууме путем химического осаждения из газовой фазы (CVD, chemical vapor deposition, метод)



Бриллиант размером 2.5 мм выращен всего за 1 день (Hemley et al., 2005)



.info